

**引用格式:**Zeng Yuyan, Shi Runhe, Liu Pudong, *et al.* Estimations of Chlorophyll Content from Vegetation Indices by Using PROSPECT and DART[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(4): 667-673. [曾毓燕, 施润和, 刘浦东, 等. 利用植被指数估算叶绿素含量的模型模拟研究——以 PROSPECT+DART 模型为例[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(4): 667-673.]  
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.4.0667

# 利用植被指数估算叶绿素含量的模型模拟研究

## ——以 PROSPECT+DART 模型为例

曾毓燕<sup>1,2</sup>, 施润和<sup>1,2,3</sup>, 刘浦东<sup>1,2</sup>, 王 弘<sup>1,2</sup>  
(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241; 2. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 3. 华东师范大学环境遥感与数据同化联合实验室, 上海 200241; 4. 华东师范大学、美国科罗拉多州立大学中美新能源与环境联合研究院, 上海 200062)

**摘要:**以我国主要速生树种桉树为建模树种, 利用基于叶片内部辐射传输机制的 PROSPECT 模型和冠层三维辐射传输模型 DART 模型, 对归一化植被指数 NDVI、结构无关色素指数 SIPI、显色指数 COI、简单比植被指数 SR、卡特指数 CAI、红边位置指数 REP\_Li 等 6 种植被指数与叶绿素含量间的关系进行了探究。结果表明:在仅叶绿素含量变化的情况下,在叶片尺度上 COI 和 SIPI 对叶片叶绿素含量较敏感,且无明显的饱和现象;在冠层尺度上 6 种植被指数均受叶面积指数 LAI 影响显著,无法用于估算叶片叶绿素含量,但可以用来估算冠层叶绿素含量,COI 和 SIPI 在这方面较其他几种植被指数效果较好。

**关 键 词:**PROSPECT; DART; 植被指数; 叶绿素含量

**中图分类号:**TP 79      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-0323(2017)04-0667-07

### 1 引 言

植被是陆地生态系统的重要组成部分,植物体内各种生化成分通过参与、控制和影响植物生理生态过程,对其物质形成、交换和能量转换发挥重要作用。叶绿素作为叶片中最主要的光合色素之一,与光合作用、初级生产等关键生理生态过程密切相关。近年来遥感已成为生态学研究的重要数据源,通过卫星遥感的光谱信息定量估算植被叶绿素含量已成为研究的热点<sup>[1]</sup>。

根据叶绿素吸收光谱特征构建植被指数是估算叶绿素含量的常用方法,随着高光谱技术的发展,形成了一批窄波段的叶绿素估算植被指数。由于野外

实测数据受到物种、叶绿素变化梯度、化学测试与光谱测量等局限,试验难度较大,试验结果的可推广性不强。利用辐射传输模型开展叶片和冠层水平叶绿素含量研究,有利于从物理机制上建立光谱与叶绿素含量之间的定量关系,为评价植被指数估算叶绿素含量的性能提供重要依据<sup>[2]</sup>。国内外许多学者在植被色素浓度反演方面进行了深入的研究,并取得了许多成功的经验和宝贵的研究结果。施润和等<sup>[3]</sup>利用叶片水平的辐射传输模型 PROSPECT 模型研究了多种高光谱植被指数定量反演叶片叶绿素含量的可行性和精度,并比较分析了各指数的稳定性和抗干扰能力;董晶晶等<sup>[4]</sup>选用 PROSAIL 模型模拟了不同冠层结构、不同观测条件下的冠层反射率,构

收稿日期:2016-07-01 ; 修订日期:2016-10-07  
基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC1302602),上海市卫计委重点学科建设项目(15GWZK0201),上海市科委重大项目(15dz1207805、13231203804),国家自然科学基金项目(41201358)。  
作者简介:曾毓燕(1991—),女,江苏宜兴人,硕士研究生,主要从事三维植被模拟方面的研究。E-mail:zengyygis@126.com。  
通讯作者:施润和(1979—),男,上海人,副教授,主要从事定量遥感研究。E-mail:rhshi@geo.ecnu.edu.cn。

建提取冠层叶绿素含量的光谱指数模型。结果表明在不同尺度上植被指数估算叶绿素含量具有较大差异。Hernández 等<sup>[5]</sup>模拟了基于 PROSPECT + DART 的高空间分辨率针叶林,得到不同叶片和冠层条件下的模拟结果,并提出一种新的指数能较好地反演不同尺度类胡萝卜素含量。Malenovsk 等<sup>[6]</sup>利用 PROSPECT+DART 模型开展了挪威云杉冠层反射率模拟,并在此基础上进行生化参数反演及其与植被指数的关系研究。由于阔叶林和针叶林在植被本身结构上有较大差异,植被指数与叶绿素含量的关系也会发生变化。于颖等<sup>[7]</sup>对比分析包括 DART 在内的三种植被冠层二向反射分布函数模型,研究 DART 的适用范围和精度,但并未对模型模拟结果进行具体应用。现有研究表明利用植被指数估算叶绿素含量时具有明显的尺度效应,有必要在不同尺度下对植被指数估算叶绿素含量的可行性和可靠性进行全面研究<sup>[8-9]</sup>。

由于不同树种的尺度效应不同,桉树是我国主要速生树种之一,具有显著的经济、社会和生态效益。但同时由于桉树的狂热发展,桉树人工林的生态脆弱性进一步凸显,引起了很多方面的问题,“桉树争论”成为全球关注的热点之一<sup>[10]</sup>。张永贺等<sup>[11]</sup>通过调用 PROSPECT 模型构建查找表来反演桉树叶片的叶绿素含量,并利用光谱分析技术和统计学方法对光谱数据进行处理分析,提取了光谱特征参量,建立叶绿素、类胡萝卜素含量与桉树叶片光谱特征参量间的估算模型,但未研究其他尺度光谱特征和光合色素之间的关系以及对光谱特征的应用。本研究以桉树为参照树种,在叶片和冠层水平上分别利用 PROSPECT 模型和 DART 模型,研究归一化植被指数 NDVI、结构无关色素指数 SIPI、显色指数 COI、简单比植被指数 SR、卡特指数 CAI、红边位置指数 REP\_Li 等 6 种植被指数在不同尺度下对叶片叶绿素含量(LCC, Leaf Chlorophyll Content)和冠层叶绿素含量(CCC, Canopy Chlorophyll Content)的估算能力。

## 2 研究数据和方法

### 2.1 PROSPECT 模型及其参数设置

PROSPECT 模型是从平板模型发展起来的一个叶片辐射传输模型,用于计算叶片在 400 ~ 2 500 nm 范围内的反射率和透射率<sup>[12-13]</sup>。该模型基于 Allen 等提出的平板模型,认为叶片是由一层或多层表面粗糙且各向同性散射的平板组成。

PROSPECT 模型有两类输入变量:一类是叶片结构参数 N,用于表示叶片中细胞的排列密实程度;另一类是叶片生化参数,包括叶绿素含量、类胡萝卜素、棕色素、等效水厚度、干物质。本研究采用的最新版 PROSPECT 模型(PROSPECT5)<sup>[14]</sup>,该模型将叶绿素和类胡萝卜素含量作为两个独立参数,是目前得到广泛认可的叶片辐射传输模型之一。为了研究叶片叶绿素含量变化对叶片光谱及其构成的植被指数的影响,参照公开的野外实测数据集 LOP-EX'93(Leaf Optical Properties Experiment)<sup>[15]</sup>中的样本数据,确定了各参数的取值,其中叶绿素含量为变量(表 1)。

表 1 PROSPECT 模型输入参数设置  
Table1 The input parameters of PROSPECT

模型	参数名称	参数符号	单位	参数值
PROSPECT5	叶片结构参数	N	—	1.8
	叶绿素含量	C <sub>ab</sub>	ug/cm <sup>2</sup>	10~90 步长 10
	类胡萝卜素	C <sub>ar</sub>	ug/cm <sup>2</sup>	10
	棕色素	C <sub>brown</sub>	ug/cm <sup>2</sup>	0
	等效水厚度	C <sub>w</sub>	cm	0.012
	干物质	C <sub>m</sub>	g/cm <sup>2</sup>	0.01

### 2.2 DART 模型及其参数设置

DART 模型是由法国 CESBIO 实验室开发的软件,是最具综合性的三维辐射传输模型之一<sup>[16]</sup>。Gastellu-Etchegorry 等<sup>[17]</sup>建立的 DART 模型最初用于模拟三维植被冠层在可见光和近红外波段的遥感影像,后来发展成为可模拟不同场景和结构参数下的复杂 3D 场景。该模型是一款基于三维辐射传输理论的前向模型,采用多种模拟方法,包括光线追踪、准蒙特卡洛光子追踪等,根据设置的像元大小将模拟的场景空间划分为同样大小的长方体,可模拟不同场景下的辐射传输过程,得到各个波段和方向上的反射率等物理量。该模型已被纳入欧盟委员会联合研究中心(JRC, Joint Research Center)的辐射传输模型交叉比较项目中(RAMI, RAdiation transfer Model Intercomparison),其模拟的可靠性得到学界认可。桉树可通过 DART 模拟的平行六面体长方形矩阵表示,并且可以在三维空间中重复,实现垂直方向上的连续性<sup>[18]</sup>。PROSPECT 模型模拟得到的桉树叶片尺度反射光谱作为 DART 模型的重要输入参数,参考已有研究和实际情况确定其他相关参数(表 2)<sup>[19]</sup>。

表 2 DART 场景输入参数  
Table2 The input parameters of DART

输入参数		单位	变量值
太阳位置	天顶角(Sun zenith)	°	40
	方位角(Sun azimuth)	°	150
场景参数	像元大小(Cell dimension)	m	0.5
	场景大小(Scene dimension)	m	14
	郁闭度(Canopy density)	%	60
树的属性	LAI	—	2~4,步长 0.2
	冠下杆高(Height below crown)	m	6
	冠下胸径(Diameter below crown)	m	0.1
	管内杆高(Height within the tree crown )	m	11
	树冠类型(Crown shape)	—	椭圆
	树冠高度(Crown height)	m	12

2.3 植被指数

植被指数(VI)是将不同波段的光谱反射率经线性或非线性组合,得到反映植被某种特征信息的指数。本文通过 PROSPECT 和 DART 模型模拟分别得到的叶片和冠层的光谱

信息,从而计算出不同尺度的植被指数。到目前为止,已经研究并提出的植被指数多达上百种,参考已有研究,本文选择了 6 种与叶绿素含量相关性较高的常见植被指数作为研究对象(表 3)。

表 3 6 种叶绿素植被指数  
Table3 6 VIs for chlorophyll content studied

指数名称	计算公式	来源
归一化植被指数(NDVI)	$(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$	(Tucker,1979) <sup>[20]</sup>
结构无关色素指数(SIPI)	$(R_{800} - R_{455}) / (R_{800} + R_{705})$	(Penuelas,1995) <sup>[21]</sup>
显色指数(COI)	$(R_{800} - R_{550}) / R_{800}$	(Liu &. MOORE,1990) <sup>[22]</sup>
简单比植被指数(SR)	$R_{800} / R_{680}$	(Jordan,1969) <sup>[23]</sup>
卡特指数(CAI)	$Cater\ Index = R_{695} / R_{760}$	(CARTER,1994) <sup>[24]</sup>
红边位置线性插值(REP_Li)	$REP\_Li = 700 + 40 * ((R_{670} + R_{780} / 2) / (R_{740} - R_{700}))$	(Guyot &. Baret,1988) <sup>[25]</sup>

注:表中 R 为反射率,下标数字表示以 nm 为单位的波长

2.4 数据归一化方法

为了消除不同植被指数之间的量纲影响,对植被指数值进行归一化处理,使各指数值处于同一数量级,适合进行综合对比评价。归一化函数为:

$$a_n = \frac{a - min}{max_a - min_a} \tag{1}$$

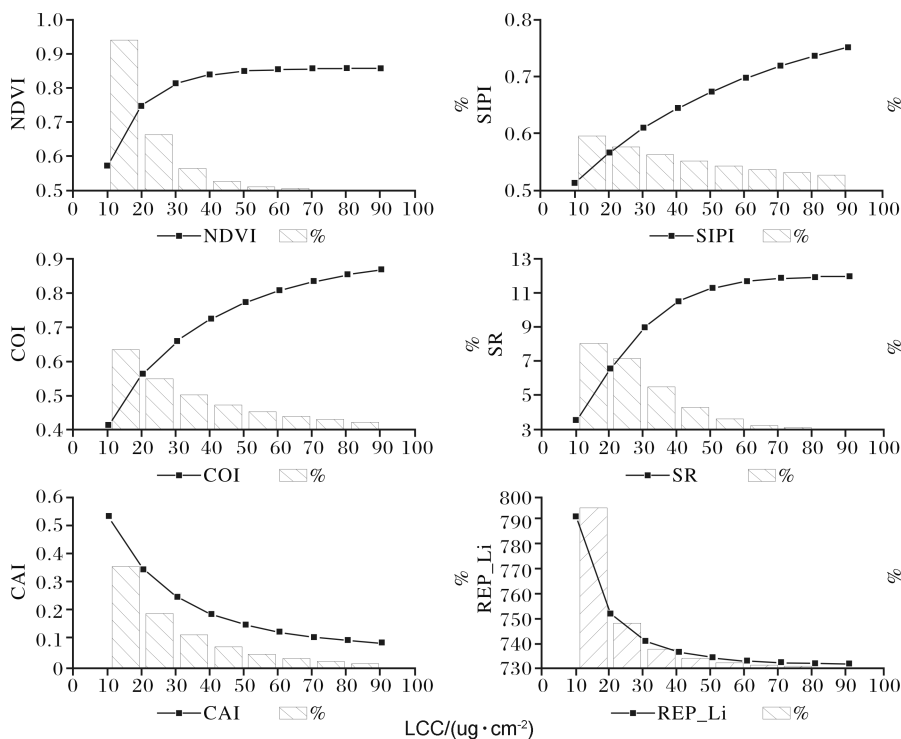
其中: $a$  为需要进行归一化处理的数据, $a_n$  为归一化后的样本数据, $max_a$  为  $a$  中的最大值, $min_a$  为  $a$  中的最小值。该方法归一化后,植被指数值的范围是[0,1]。

3 结果与分析

3.1 叶片尺度下叶片叶绿素含量(LCC)对植被指数的影响

利用 PROSPECT5 模型模拟不同叶片叶绿素含

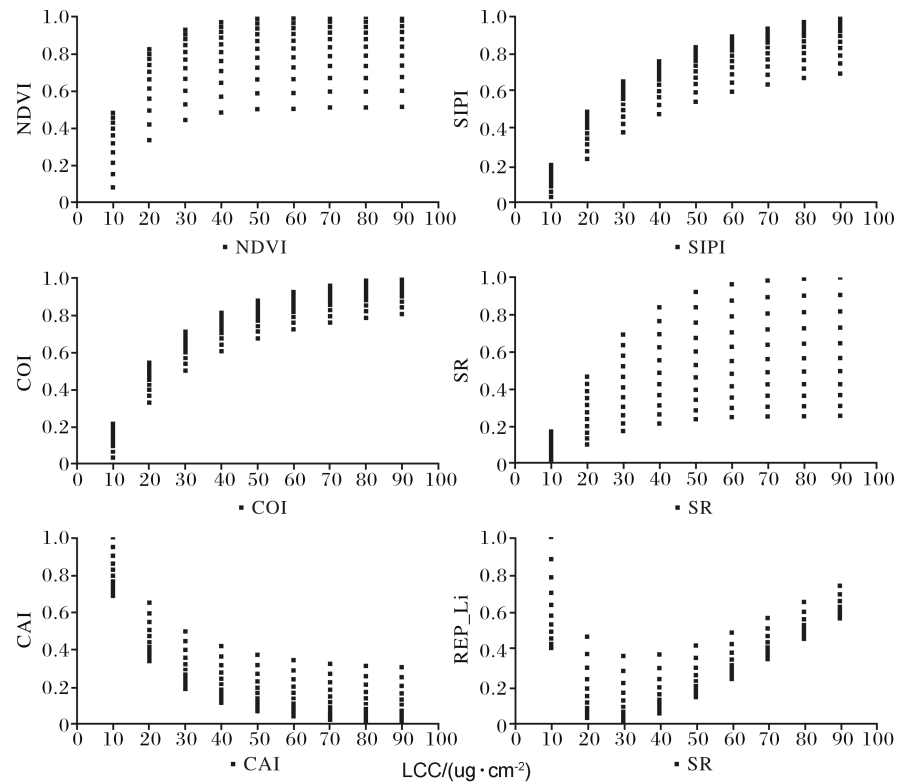
量下的叶片反射光谱,计算得到植被指数,绘制其随叶片叶绿素含量的变化曲线。从图 1 曲线可知,CAI 和 REP\_Li 随着 LCC 的增大而减小,而其他 4 种植被指数都是呈正相关。就饱和性而言,随着 LCC 的增加,NDVI 和 REP\_Li 最容易出现饱和,在 LCC 大于 40 ug/cm<sup>2</sup>时即出现明显的饱和现象;其次是 SR 和 CAI,在 LCC 大于 60 ug/cm<sup>2</sup>时出现饱和现象;SIPI 和 COI 没有出现明显的饱和现象,当 LCC 较大时仍保持较好的增长关系。柱状图反映的是植被指数在每个 LCC 变化区间中的变化占其总变化的百分比,从图中可见,当 LCC 增大时,同样 10 ug/cm<sup>2</sup> 的 LCC 变化引起的植被指数变化都是越来越小,即植被指数对于 LCC 的敏感性随着 LCC 的增加而降低。在 LCC 介于 10~20 ug/cm<sup>2</sup>变化时,NDVI 和 REP\_Li 最敏感。



(左侧纵坐标表示具体植被指数值, 右侧纵坐标表示植被指数变化百分比)

图 1 叶片尺度 LCC 与植被指数的关系

Fig.1 The relationship between LCC and VIs at leaf scale



(对于每一种叶绿素含量, LAI 取值 2~4, 步长 0.2)

图 2 冠层尺度 LCC 与植被指数的关系

Fig.2 The relationship between LCC and VIs at canopy scale

(when LCC is constant, LAI=2~4, step 0.2)

3.2 冠层尺度下叶片叶绿素含量(LCC)对植被指数的影响

在冠层尺度上,利用 PROSPECT+DART 耦合模型研究在不同 LAI 下, LCC 与各植被指数的关系,并对植被指数进行归一化处理。如图 2 所示,在冠层尺度上受 LAI 影响显著,对于相同的 LCC,各植被指数均呈现较大幅度的变化。SR 随 LCC 的增加,受 LAI 的影响愈加明显,在图上呈发散状; REP\_Li 在冠层水平上随 LCC 的增加呈现出非单调变化特征;相对而言,COI 受 LAI 变化的影响在最小,但当 LCC 从 10 ug/cm<sup>2</sup> 增加至 90 ug/cm<sup>2</sup> 时, COI 的变化幅度明显小于叶片尺度上的变化幅度,即在冠层尺度上 COI 对 LCC 变化的敏感性有明显降低。因此,本研究考察的 6 种叶绿素植被指数都存在明显的尺度效应,无法直接用于估算冠层尺度下的 LCC。

进一步分析 LAI 对上述植被指数的影响,将各植被指数进行归一化处理,结果如图 3 所示。可见, LAI 对植被指数的影响与 LCC 对植被指数的影响

类似, CAI 和 REP\_Li 随 LAI 的增大而减小,而其他四种植被指数则呈正相关。LAI 作为冠层结构参数,对基于植被指数的 LCC 估算产生明显干扰,但鉴于 LAI 与 LCC 对植被指数的影响呈现类似的变化规律,因此本文进一步考察植被指数在估算两者的乘积,即冠层叶绿素含量(CCC)方面的可行性。

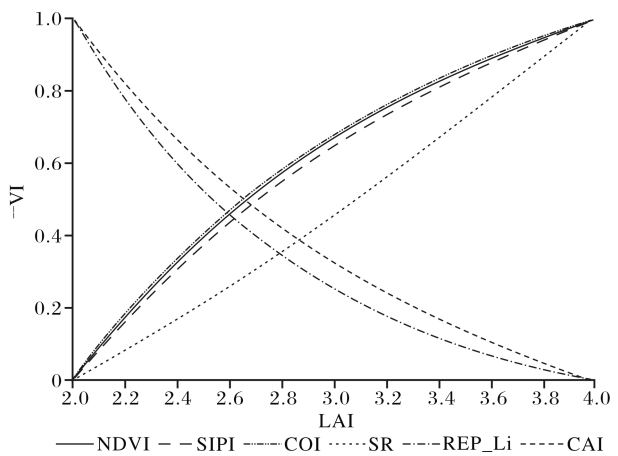


图 3 LAI 与植被指数的关系  
Fig.3 The relationship between LAI and VIs

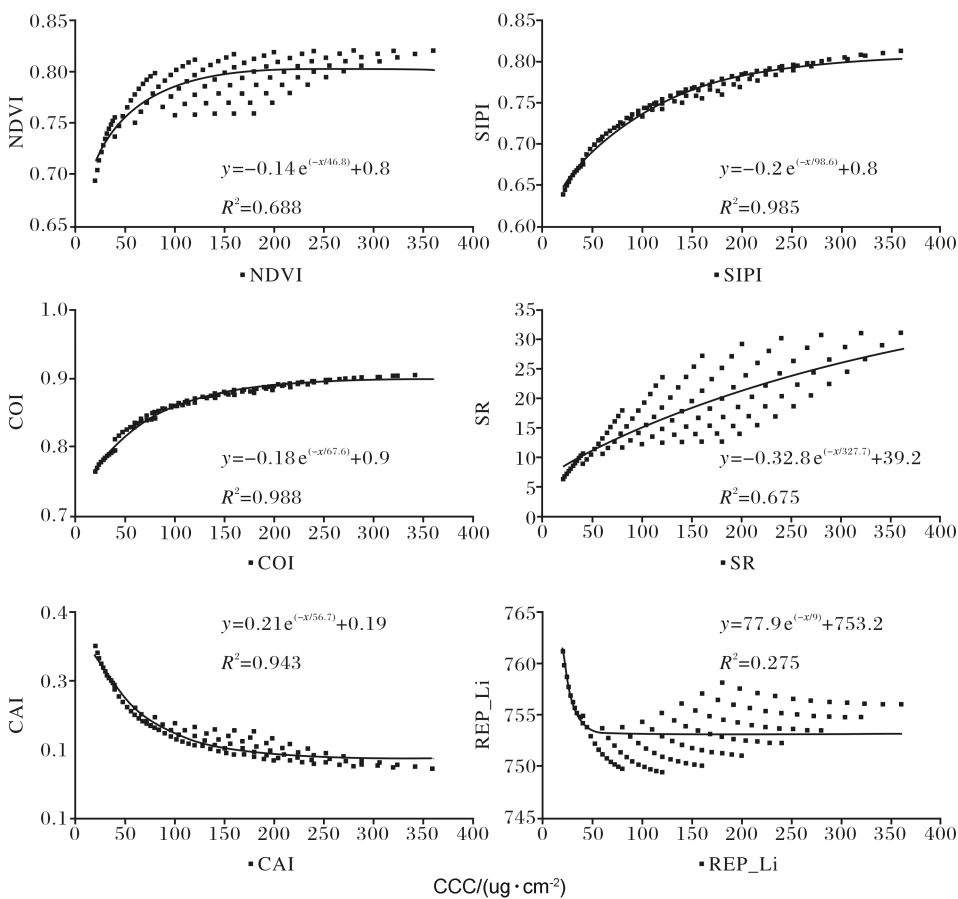


图 4 冠层叶绿素含量与植被指数的关系  
Fig.4 The relationship between CCC and VIs

### 3.3 冠层叶绿素含量(CCC)对植被指数的影响

冠层叶绿素含量(CCC)可以反映植物冠层整体的叶绿素状况,其计算公式如(1)所示:

$$CCC = LCC \cdot LAI \quad (1)$$

根据本研究在 PROSPECT+DART 模型中的 LCC 和 LAI 取值(表 1、2),绘制散点图并进行非线性拟合,得到 CCC 与植被指数之间的关系(图 4)。从散点形态上看,COI 和 SIPI 中散点与拟合线的聚集程度好,而其他 4 种指数均呈现不同程度发散,表示随着 CCC 的增加,这些植被指数的估算性能降低;从拟合趋势线看,植被指数与 CCC 的关系呈现非线性,而植被指数的动态变化范围小于叶片尺度(图 1),且仍存在饱和现象。

## 4 结论与讨论

本文选取了 6 种在叶片和冠层两个尺度与叶绿素含量相关性都较高的植被指数,利用 PROSPECT 和 DART 模型模拟植被指数在不同尺度下对叶片叶绿素含量(LCC)和冠层叶绿素含量(CCC)的估算能力。在仅叶绿素含量变化的情况下得到以下结论:

(1)在叶片尺度上,植被指数对于 LCC 的敏感性随着 LCC 的增加而降低;当 LCC 较低时,本文所用的 6 个植被指数都可以用来估算 LCC,且 NDVI 和 REP\_Li 最敏感,但随着 LCC 的增加,NDVI 和 REP\_Li 最容易出现饱和;SIPI 和 COI 对 LCC 较敏感且无明显饱和现象,适合用来估算 LCC。

(2)在冠层尺度上,植被指数估算 LCC 受 LAI 影响显著,无法直接估算 LCC;植被指数与 CCC 的关系呈非线性,但动态变化范围小于叶片尺度,且仍存在饱和现象;SIPI 和 COI 与 CCC 拟合关系较好,因此在叶片和冠层两个尺度上 SIPI 和 COI 都可以较好地估算叶绿素含量。

植被指数能够用来估算生化参数从而探究植被基于光谱特性的变化,由于受冠层异质性及其结构的影响,叶片尺度结果不能直接应用于冠层尺度。研究发现基于辐射传输模型的植被指数和叶绿素含量的相关性在叶片和冠层尺度有很大差别。但同时也存在一些植被指数在不同尺度上与叶绿素含量相关性较高,能较好地运用于不同尺度叶绿素含量的估算。DART 模型在建立场景时输入参数较复杂,本文在研究冠层尺度叶绿素含量对植被指数的影响时,只选择了桉树作为参照树种用于建立植物模型,并将除叶绿素、LAI 以外的其他参数均设为固定值,

未考虑其他参数对模型模拟结果的影响,在后续研究中将其他参数进一步深入探讨。

### 参考文献(References):

- [1] Demarez V, Gastellu-Etchegorry J P. A Modeling Approach for Studying Forest Chlorophyll Content[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(2): 226-238.
- [2] Barry K M, Newnham G J, Stone C. Estimation of Chlorophyll Content in Eucalyptus Globulus Foliage with the Leaf Reflectance Model PROSPECT[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(6): 1209-1213.
- [3] Shi Runhe, Zhuang Dafang, Niu Zheng, *et al.* Quantitative Inversion of Chlorophyll Content based on Radiative Transfer Model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(5): 591-595. [施润和, 庄大方, 牛铮, 等. 基于辐射传输模型的叶绿素含量定量反演[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 591-595.]
- [4] Dong Jingjing, Wang Li, Niu Zheng. Estimation of Canopy Chlorophyll Content Using Hyperspectral Data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(11): 3003-3006. [董晶晶, 王力, 牛铮. 植被冠层水平叶绿素含量的高光谱估测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(11): 3003-3006.]
- [5] Hernandez-Clemente R, Navarro-Cerrillo R M, Zarco-Tejada P J. Carotenoid Content Estimation in a Heterogeneous Conifer Forest Using Narrow-band Indices and PROSPECT + DART Simulations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127: 298-315.
- [6] Malenovsk Z, Homolov L, Zurita-Milla R, *et al.* Retrieval of Spruce Leaf Chlorophyll Content from Airborne Image Data Using Continuum Removal and Radiative Transfer[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131: 85-102.
- [7] Yu Ying, Fan Wenyi, Yang Xiguang. Comparisons of Three Models for Vegetation Canopy Bi-Directional Reflectance Distribution Function[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(1): 55-62. [于颖, 范文义, 杨曦光. 三种植被冠层二向反射分布函数模型的比较[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(1): 55-62.]
- [8] Xiao Yanfang, Zhou Deming, Zhao Wenji. Review of Inverting Biophysical and Biochemical Vegetation Parameters in Various Spatial Scales Using Radiative Transfer Models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(11): 3291-3297. [肖艳芳, 周德民, 赵文吉. 辐射传输模型多尺度反演植被理化参数研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(11): 3291-3297.]
- [9] Xu Jin, Meng Jihua. Overview on Estimating Crop Chlorophyll Content with Remote Sensing[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(1): 74-85. [徐晋, 蒙继华. 农作物叶绿素含量遥感估算的研究进展与展望[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(1): 74-85.]
- [10] Wen Yuanguang, Zheng Xian, Li Mingchen, *et al.* Effects of Eucalypt Plantation Replacing Masson Pine Forest on Soil Physiochemical Properties in Guangxi, Southern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(6): 145-148. [温远光, 郑羨, 李明臣, 等. 广西桉树林取代马尾松林对土壤理化性质的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(6): 145-148.]
- [11] Zhang Yonghe, Chen Wenhui, Guo Qiaoying, *et al.* Hyperspectral Estimation Models for Photosynthetic Pigment Con-

- tents in Leaves of Eucalyptus[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 876-887. [张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 等. 桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 876-887.]
- [12] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34(2): 75-91.
- [13] Jacquemoud S, Ustin S L, Verdebout J, *et al.* Estimating Leaf Biochemistry Using the PROSPECT Leaf Optical Properties Model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 56(3): 194-202.
- [14] Feret J B, François C, Asner G P, *et al.* PROSPECT-4 and 5: Advances in the Leaf Optical Properties Model Separating Photosynthetic Pigments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 3030-3043.
- [15] Gastellu-Etchegorry J P. 3D Modeling of Satellite Spectral Images, Radiation Budget and Energy Budget of Urban Landscapes[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2008, 102(3-4): 187-207.
- [16] Gastellu-Etchegorry J P, Demarez V, Pinel V, *et al.* Modeling Radiative Transfer in Heterogeneous 3-D Vegetation Canopies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(2): 131-156.
- [17] Hosgood B, Jacquemoud S, Andreoli G. Leaf Optical Properties Experiment 93 ( LOPEX93) Report EUR-16096-EN, Ispra, Italy; European Commission, Joint Research Centre, Institute for Remote Sensing Applications, 1995.
- [18] Gastellu-Etchegorry J P, Yin T, Lauret N, *et al.* Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART 5) for Modeling Airborne and Satellite Spectroradiometer and LiDAR Acquisitions of Natural and Urban Landscapes[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(2): 1667-1701.
- [19] Zhang Weiqiang, Zhang Weihua, Pan Wen, *et al.* Effects of Eucalypt Plantation and Conifer-Broadleaved Forest on Plant Biodiversity[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, (6): 122-128. [张卫强, 张卫华, 潘文, 等. 桉树林和针阔混交林对植物多样性的影响比较[J]. *水土保持研究* 2014, (6): 122-128.]
- [20] Tucker C J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [21] Penuelas J, BARET 'Hr F, Filella I. Semi-Empirical Indices [J]. *Photosynthetica*, 1995, 31(2): 221-230.
- [22] Liu J G, Moore J M M. Hue Image RGB Colour Composition. A Simple Technique to Suppress Shadow and Enhance Spectral Signature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(8): 1521-1530.
- [23] Jordan C F. Derivation of Leaf - Area Index from Quality of Light on the Forest Floor[J]. *Ecology*, 1969, 50(4): 663-666.
- [24] Carter G A. Ratios of Leaf Reflectances in Narrow Wavebands as Indicators of Plant Stress [J]. *Remote Sensing*, 1994, 15(3): 697-703.
- [25] Guyot G, Baret F. Utilisation De La Haute Resolution Spectrale Pour Suivre L'etat Des Couverts Vegetaux[C]// *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, 1988, 287: 279.

## Estimations of Chlorophyll Content from Vegetation Indices by Using PROSPECT and DART

Zeng Yuyan<sup>1,2</sup>, Shi Runhe<sup>1,2,3</sup>, Liu Pudong<sup>1,2</sup>, Wang Hong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Joint Laboratory for Environmental Remote Sensing and Data Assimilation, ECNU and CEODE, Shanghai 200241, China; 4. Joint Research Institute for New Energy and the Environment, East China Normal University and Colorado State University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** With the aid of a well-known leaf optical model PROSPECT and a canopy scale model DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer), sensitivities between chlorophyll content and six different vegetation indices were investigated by simulating eucalyptus, one of a dominant fast-growing tree in China, as an example. Vegetation indices used here include Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Structure Insensitive Pigment Index (SIPI), Colouration Index (COI), Simple Ratio Index (SR), Cater Index (CAI), and Red-edge Position Linear Interpolation (REP\_Li). Results indicate that at the leaf scale, COI and SIPI are sensitive to the LCC (Leaf Chlorophyll Content) as the Chlorophyll Content changes. Meanwhile, no obvious saturation phenomenon is observed for these two indices compared to other indices. Further investigations show that all these vegetation indices are incapable of estimating LCC at the canopy scale, due to significant influences from LAI (Leaf Area Index). Nevertheless, it suggests that SIPI and COI can be applied to estimate the CCC (Canopy Chlorophyll Content).

**Key words:** PROSPECT; DART; Vegetation indices; Chlorophyll Content